

DOI: <https://doi.org/10.31534/CO/ZT.2018.19>

## Eksperimentalno istraživanje i numeričko modeliranje lijepljenog lameliranog drva

Jelena Lovrić Vranković<sup>1</sup>, Ivica Boko<sup>1</sup>, Vladimir Divić<sup>1</sup>

(1) Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Republika Hrvatska, {jlovric; iboko; vdivic}@gradst.hr

### Sažetak

U ovom su radu prikazani eksperimentalni testovi i numeričko modeliranje lijepljenih lameliranih greda izrađenih od različitih vrsta mekog i tvrdog drva (hrast, bagrem i smreka). Lijepljene lamelirane grede promatrane su tijekom ispitivanja na savijanje u tri točke na kratkim uzorcima. Eksperimentalni testovi uključuju mjerenja primijenjenih sila te deformacija i pomaka pomoću linearnog varijabilnog diferencijalnog transformatora (LVDT). U radu su prikazane karakteristike ispitnih uzoraka, postupak i rezultati ispitivanja na savijanje te modeliranje istih uzoraka pomoću računalnog programa ANSYS 16.2. Cilj ovog istraživanja je opisati ponašanje svakog uzorka posebno. Posebna pozornost se posvećuje analizi tipa i mehanizma otkazivanja greda izrađenih od tvrdog i mekog drva. Mehanička svojstva dobivena iz eksperimenata uspoređena su s rezultatima dobivenim numeričkom analizom.

*Ključne riječi:* lijepljeno lamelirano drvo, test savijanja u 3 točke, mehanizam otkazivanja, Ansys

## Experimental testing and numerical modelling of glued laminated timber

### Abstract

This paper presents experimental testing and numerical modelling of glulam beams made from different softwood and hardwood species (oak, acacia and spruce). The glulam beams are observed during 3-points bending tests on short samples. Experimental tests include measuring applied forces, deformations and displacements using the linear variable differential transducer (LVDT). The present report shows details of the test specimens, test set-up, results of the bending tests and numerical modelling using computer program Ansys. The current research aims to describe the behaviour of each specimen individually. Particular attention is given to the accurate analysis of the type and mechanisms of failure of beams made of hardwood and softwood. The mechanical properties obtained from the experiments are compared with the results from numerical analysis software.

*Keywords:* glue laminated timber, 3-points bending test, mechanisms of failure, Ansys

## **1. Uvod**

Drvo je ekološki i obnovljiv materijal te je jedan od najvažnijih prirodnih materijala. Ima specifična fizikalna, kemijska, mehanička i tehnološka svojstva. Prednosti drva koje ga čine ravnopravnim s ostalim građevnim materijalima su: mala težina elemenata, laka obradljivost, velika čvrstoća paralelno s vlakancima, mala osjetljivost na temperaturne promjene, mnogobrojne mogućnosti oblikovanja i montaže te transporta konstrukcijskih elemenata. Pored prednosti, drvo ima i svoje nedostatke, a to su nehomogenost, utjecaj insekata i gljiva, higroskopnost, ovisnost mehaničkih svojstava o sadržaju vlage u drvu, skupljanje i bubrenje te zapaljivost. Isto tako, drvo je anizotropan materijal, ali se obično smatra ortotropnim materijalom s tri glavne osi ortotropije L, R i T (uzdužna, radijalna i tangencijalna) među kojima postoji velika razlika u mehaničkim svojstvima [1]. Uzdužna os L je paralelna s vlakancima, radijalna os R je okomita na vlakanca (u smjeru normale na rast godova), dok je tangencijalna os T okomita na vlakanca u smjeru tangente na rast godova. Između ostalog, drvo u konstrukcijskom smislu možemo upotrebljavati kao monolitno (puno) drvo te lijepljeno lamelirano drvo. Lijepljeno lamelirano drvo podrazumijeva konstrukcijski element dobiven lijepljenjem lamela različitih dimenzija koji u nosivoj konstrukciji ima bolja mehanička svojstva od monolitnog piljenog drva. Također, ovisno o mikrostrukтури, drvo možemo podijeliti na meko drvo (četinjače) i tvrdo drvo (listače). Upotreba mekog drva u lijepljenim lameliranim nosačima je dominantna već dugi niz godina zbog svoje dostupnosti diljem Europe. U posljednje vrijeme, dostupnost tvrdog drva se povećala zbog pošumljavanja i obnove pokrivača šume te bolje prilagodbe tlu i utjecaju na klimatske uvjete. Tvrdo drvo ima veću gustoću što implicira bolje mehaničke karakteristike od mekog drva, dok je lijepljenje lamela od tvrdog drva puno kompleksnija zadaća zbog drugačije strukture vlakana.

U ovom su radu prikazana eksperimentalna istraživanja lijepljenih lameliranih greda izrađenih od različitih vrsta drva (hrast, bagrem i smreka). Jedan od koraka u ovom istraživanju bio je prikupiti materijalne karakteristike svake grede pojedinačno te ih koristiti kao ulazne podatke za numerički model. Poseban naglasak dan je na usporedbi načina otkazivanja mekog i tvrdog drva. Rezultati su pokazali kako mehanizmi otkazivanja koji uključuju vlačni lom praćen delaminacijom, uzrokuju smanjenje krutosti i povećanje deformacija greda [2]. Konačno, rezultati eksperimentalnih testova su uspoređeni s rezultatima numeričke analize.

## **2. Metodologija**

### **2.1. Eksperiment**

Eksperiment se provodio u laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu. Prije ispitivanja, izmjerene su točne dimenzije tri uzorka pravokutnog poprečnog presjeka (Tablica 1). Lijepljene lamelirane grede ispitane su savijanjem u 3 točke (engl. 3-point bending tests). Eksperimentalni testovi uključuju mjerenja primijenjenih sila, deformacija i pomaka. Uzorci S1 i S2 postavljeni su na dvije metalne šipke dimenzija 25 mm

koje su oslonjene na dvije betonske kocke (Slika 1), dok je uzorak S3 postavljen na dva metalna elementa dimenzija 10 x 10 x 100 mm koji su oslonjeni na dvije betonske kocke.

**Tablica 1.** Dimenzije greda

Uzorak	Vrsta drva	Poprečni presjek [mm/mm]	Duljina [mm]	Broj lamela
S1	Hrast	100/103	800	5
S2	Bagrem	93/103	800	5
S3	Smreka	99/100	800	3



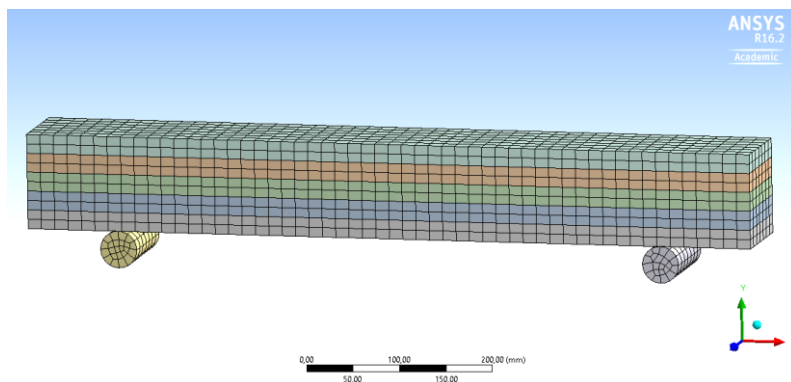
**Slika 1.** Eksperiment

Sila se unosi hidrauličkom prešom postupno kroz vrijeme do trenutka otkazivanja elementa na polovini duljine elementa. Pomaci i deformacije su mjereni pomoću LVDT-a (linearni varijabilni diferencijalni transformator) na sredini uzorka. LVDT senzor pretvara pravocrtne pomake objekta za koji je mehanički pričvršćen u odgovarajući električni signal. Korišten je senzor proizvođača HBM, nominalnog hoda 100 mm. Za mjerenje sile korištena je mjerna ćelija proizvedena na FGAG-u nazivne nosivosti 150 kN.

## 2.2. Numerički model

Lijepljene lamelirane grede modelirane su u računalnom programu ANSYS Workbench 16.2 [3] zadavanjem karakteristika materijala i geometrije nosača (Slika 2). Provedena analiza je geometrijski nelinearna te je obavljen statički proračun. Računalni program ANSYS koristi Newton-Raphson metodu kao iterativni postupak rješavanja. U svakom iteracijskom koraku mijenja se tangencijalna matrica krutosti koja predstavlja nagib krivulje u dijagramu sila/progib osnovnog stanja iz kojeg polazi iteracijski korak. Inkrement progiba/rotacije izračunat je u svakom koraku sve dok se neravnoteža sila (rezidual) ne smanji na zadovoljavajuće malu vrijednost. Prilikom modeliranja koristio se koordinatni sustav koji se sastojao od tangencijalne (T), longitudinalne (L) i radijalne komponente (R). Unesene su karakteristike koje uključuju gustoću te ortotropna elastična svojstva materijala ( $E_L, E_T, E_R, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{RL}, G_{LT}, G_{RT}, G_{RL}$ ) (Tablica 2), gdje E označava modul elastičnosti, G modul posmika dok  $\nu$  označava Poissonov koeficijent. Neke mehaničke karakteristike su preuzete iz literature u svrhu modeliranja. Odabrana veličina mreže konačnih elemenata je 15 mm. S obzirom na to da je debljina lijepljenog sloja zanemariva u

odnosu na debljinu lamele, odabrana je vezana kontaktna površina između lamela (engl. bonded) što oponaša ponašanje ljepila [4]. Karakteristike lijepljenja kontaktne površine prikazane su na Slici 3. S obzirom na to da se u eksperimentu sila unosila kroz vrijeme, u numeričkom modelu taj je problem riješen tabličnim unosom sile u obliku 9 točaka sile (kN) – vrijeme (s), a koje su preuzete iz eksperimenta. U računalnom modelu promatrale su se deformacije, pomaci i naprezanja.



Slika 2. Ansys – 3D model

Details of "Contact Region"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	Solid
Target Bodies	Solid
Definition	
Type	Bonded
Scope Mode	Automatic
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Trim Tolerance	2,0374 mm
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Pinball Region	Program Controlled
Geometric Modification	
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None

Slika 3. Karakteristike lijepljene kontaktne površine

**Tablica 2.** Karakteristike materijala

Uzorak	Vrsta drva	ME_L [N/mm <sup>2</sup> ]	ME_T [N/mm <sup>2</sup> ]	ME_R [N/mm <sup>2</sup> ]	V <sub>TR</sub>	V <sub>RL</sub>	V <sub>TL</sub>
1	Hrast	13000	1000	2000	0.292	0.064	0.033
S2	Bagrem	9900	810	1525	0.300	0.074	0.036
S3	Smreka	11100	477	866	0.245	0.004	0.025

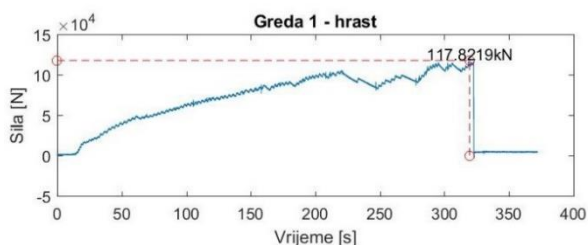
### 3. Rezultati

Uspoređeni su rezultati dobiveni numeričkim modeliranjem u programu ANSYS i eksperimentalnim testom (Tablica 3.) te se može uočiti dobro podudaranje rezultata.

**Tablica 3.** Usporedba eksperimentalnog testa i numeričkog modela

Uzorak	Vrsta drva	Granično opterećenje [kN]	Pomak [mm] (Eksperimentalni test)	Pomak [mm] (Numerički model)
S1	Hrast	117.8	27	28.47
S2	Bagrem	94.2	25	23.1
S3	Smreka	56	11.5	13.9

Do otkazivanja uzorka S1 (hrast – tvrdo drvo) došlo je pri sili od 117.8 kN (Slika 4). Nakon što je dostignuta ova vrijednost, došlo je do naglog pada sile i loma uzorka te daljnjeg širenja pukotina oko područja donje lamele u vlačnoj zoni. Iz priložene fotografije (Slika 5) može se vidjeti oblik otkazivanja nosača – vlačni lom ispod mjesta unosa sile (na sredini nosača) praćen delaminacijom između lamela. Uzorak S2 otkazao je na isti način kao i uzorak S1. Što se tiče otkazivanja uzorka S3, može se uočiti oblik otkazivanja nosača – lom po lameli koji počinje od lijevog kraja nosača i širi se prema sredini nosača (Slika 6).



**Slika 4.** Graf sila – vrijeme za uzorak S1



**Slika 5.** Uzorak S1



**Slika 6.** Uzorak S3

#### **4. Zaključak**

U ovom su radu ispitivana mehanička svojstva lijepljenih lameliranih greda proizvedenih od različitih vrsta drva. Numerička analiza napravljena u programu Ansys 16.2. potvrdila je rezultate eksperimentalnog istraživanja. U vezi s načinom otkazivanja, može se uočiti kako su uzorci S1 i S2, a koji su izrađeni od tvrdog drva (hrast i bagrem), otkazali tako da je došlo do vlažnog loma po sredini uzorka praćenog delaminacijom između pojedinih lamela. Uzorak S3, izrađen od mekog drva (smreka), otkazao je uslijed loma koji se dogodio po lameli, a koji počinje od lijevog kraja nosača i širi se prema sredini nosača. Iz prethodno navedenog može se zaključiti kako je lijepljenje lamela izrađenih od tvrdog drva puno kompleksnija zadaća zbog drugačije strukture vlaknaca u odnosu na lamele od mekog drva na koje ljepilo bolje prijanja.

Preporučuje se provesti nova istraživanja kojima bi se testiranja vršila na gredama lijepljenim različitim vrstama ljepila te također na gredama izrađenim od različitih vrsta tvrdog i mekog drva. Isto tako, potrebno je povećati broj uzoraka te provesti statističku analizu.

## **Literatura**

- [1] Green, D.W., Winandy, J.E., Kretschmann, D.E.: Mechanical properties of wood, Wood handbook: Wood as an engineering material, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, pp. 4.1-4.45, 1999.
- [2] Gomes Ferreira, J., Cruz, H., Silva, R.: Failure behaviour and repair of delaminated glulam beams, Construction and Building Materials, 154, pp. 384-398, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.200.
- [3] Ansys, Inc. Canonsburg, PA 15317, Release 16.2, 2015.
- [4] Umaima Muhammed, C.K., Arya, R.: Analytical Study on Flexural Behaviour of Glued Laminated Timber, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, pp. 2485-2493, 2015, doi: 10.15680/IJIRSET.2016.0507110.